

# METHOD AND DEVICE FOR DRILLING HOLES AT PITCH SMALLER THAN WAVE LENGTH BY USING LASER BEAM

**Publication number:** JP2002018585 (A)

**Publication date:** 2002-01-22

**Inventor(s):** SHINBIN RYUU; LU MING

**Applicant(s):** MATSUSHITA ELECTRIC IND CO LTD

**Classification:**

- international: B82B3/00; B23K26/00; B23K26/02; B23K26/06; B23K26/073; B23K26/38; B82B3/00; B23K26/00; B23K26/02; B23K26/06; (IPC1-7): B23K26/00; B23K26/02; B23K26/06; B82B3/00

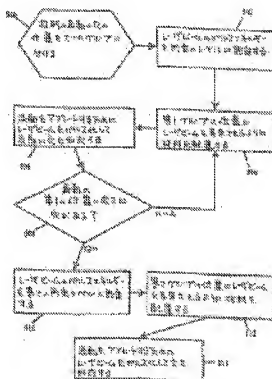
- European:

**Application number:** JP20000391084 20001222

**Priority number(s):** US19990171894P 19991223

## Abstract of JP 2002018585 (A)

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To provide a method of a laser beam machining, by which plural holes are drilled at a pitch smaller than the wave length of the laser beam. **SOLUTION:** Plural holes to be drilled on a material are divided into two groups. The pitch of the holes of the first group is set beyond a hardening zone accompanying the laser beam machining. The pitch of those of the second group is set in a region which does not deviate from the hardened zone around the holes of the first group. The holes of the first group are drilled by using a laser beam which is set at a specified energy level or pulse numbers, then the energy intensity of the laser beam is enhanced up to an energy level higher than the threshold value of the ablation of the hardened material, and the holes of the second group are drilled.



(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テマコード(参考)
B 2 3 K 26/00	3 3 0	B 2 3 K 26/00	3 3 0 4 E 0 6 8
26/02		26/02	N
26/06		26/06	A
B 8 2 B 3/00		B 8 2 B 3/00	E

審査請求 未請求 請求項の数27 O L 外国語出願 (全 34 頁)

(21) 出願番号 特開2000-391084(P2000-391084)

(22) 出願日 平成12年12月22日 (2000.12.22)

(31) 優先権主張番号 60/171,894

(32) 優先日 平成11年12月23日 (1999.12.23)

(33) 優先権主張国 米国 (U S)

(71) 出願人 000005821

松下電器産業株式会社

大阪府門真市大字門真1006番地

(72) 発明者 シンビン リュウ

アメリカ合衆国 マサチューセッツ

01720, アクトン, ブリーチャー ロード 3

(72) 発明者 ミン リ

アメリカ合衆国 コネチカット 06269,

ストース, ユー-46, ヒルサイド

ロード 2152

(74) 代理人 100078282

弁理士 山本 秀策

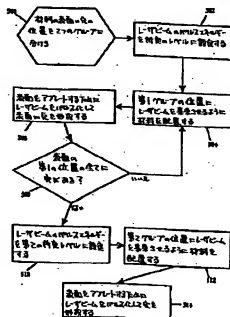
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 レーザを用いて波長より小さなピッチで穴を開けるための方法および装置

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 レーザの波長よりも小さなピッチの複数の穴をあけることのできるレーザ加工方法を提供する。

【解決手段】 材料上にあけるべき複数の穴を、2つのグループに分ける。第1グループは、その穴間隔をレーザ加工に伴う硬化領域を超えて設定する。第2グループは、第1グループの穴から硬化領域を超えない範囲に設定する。第1グループの穴を所定のエネルギーレベルあるいはパルス数に設定したレーザを用いてあけ、次に硬化された材料のアブレーション閾値より高いエネルギーレベルにまでレーザビーム強度を増大し、これにより第2グループの穴をあける。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 超高速パルスレーザビームを用いて、材料に複数の穴を開ける方法であって、

a) 該レーザビームのパルスエネルギーを第1の所定レベルに設定する工程であって、該第1の所定レベルが、該レーザビームの穿孔部分内に該材料のアブレーション閾値よりも高い強度を提供するように選択される、工程と、

b) 該材料の表面の複数の第1の位置のうちの1つに該レーザビームを集束させるように、該材料を配置する工程と、

c) 該レーザビームの多数のパルスを当てて該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴のうちの1つを形成する工程と、

d) 該表面の該複数の第1の位置の全てが該複数の穴のうちの1つを有するまで該工程b) およびc) を繰り返す工程と、

e) 該レーザビームの該パルスエネルギーを第2の所定レベルに設定する工程であって、該第2の所定レベルが、該レーザビームの該穿孔部分内に該材料のレーザ硬化アブレーション閾値よりも高い強度を提供するように選択される、工程と、

f) 該表面の少なくとも1つの第2の位置のうちの1つに該レーザビームを集束させるように、該材料を配置する工程であって、該1つの第2の位置が、該複数の第1の位置のうちの隣接する2つの間にある、工程と、

g) 該レーザビームの多数のパルスを当てて該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴のうちの1つを形成する工程と、を包含する方法。

【請求項2】 前記少なくとも1つの第2の位置が複数の第2の位置を含む、該複数の第2の位置のそれぞれが、前記複数の第1の位置のうちの隣接する2つの間にある、前記方法は、

h) 前記表面の該複数の第2の位置の全てが前記複数の穴のうちの1つを有するまで該工程f) およびg) を繰り返す工程と、

i) 前記レーザビームの前記パルスエネルギーを、前記第2の所定レベルよりも高い第3の所定レベルに設定する工程と、

j) 該表面の少なくとも1つの第3の位置のうちの1つに該レーザビームを集束させるように、前記材料を配置する工程であって、該1つの第3の位置が、該複数の第1の位置のうちの1つと、該複数の第2の位置のうちの隣接する1つとの間にある、工程と、

k) 該レーザビームの多数のパルスを当てて該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴のうちの1つを形成する工程と、をさらに包含する、請求項1に記載の方法。

【請求項3】 前記レーザビームがTE<sub>M</sub>、<sub>0</sub>モードで発振するようにレーザを動作させる工程をさらに包含す

る、請求項1に記載の方法。

【請求項4】 前記レーザビームがある波長を有し、該レーザビームの前記パルスエネルギーを前記第1の所定レベルに設定する前記工程は、該レーザビームの前記穿孔部分が該レーザビームの該波長よりも小さな直径を有するように規定するために、該レーザビームの該パルスエネルギーを設定する工程を含む、請求項1に記載の方法。

【請求項5】 前記レーザビームが775ナノメートルの波長を有し、該レーザビームの前記パルスエネルギーを設定する前記工程は、該レーザビームの前記穿孔部分を約500nmの直径を有するように規定する、請求項4に記載の方法。

【請求項6】 前記レーザビームの前記パルスエネルギーを前記第2の所定レベルに設定する前記工程が、該パルスエネルギーの該第2の所定レベルを、該パルスエネルギーの前記第1の所定レベルよりも高いレベルに設定する工程を含む、請求項1に記載の方法。

【請求項7】 前記レーザビームの前記パルスエネルギーを前記第1の所定レベルに設定する前記工程が、該パルスエネルギーを1ナノジュールと1マイクロジュールとの間に設定する工程を含む、請求項1に記載の方法。

【請求項8】 材料に複数の穴を開ける装置であって、レーザビームを提供する超高速パルスレーザと、該超高速パルスレーザに結合された、該レーザビームのパルスエネルギーを第1の所定レベルに設定する手段であって、該第1の所定レベルが、該レーザビームの穿孔部分内に該材料のアブレーション閾値よりも高い強度を提供するように選択される、手段と、

該材料の表面の複数の第1の位置のそれぞれに該レーザビームを集束させるように、該材料を該複数の第1の位置に配置する、平行移動テーブルと、

該レーザビームの多数のパルスを当てて、該第1の複数の位置のそれぞれの該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴の第1の部分形成する手段と、

該レーザビームの該パルスエネルギーを第2の所定レベルに設定する手段であって、該第2の所定レベルが、該レーザビームの該穿孔部分内に該材料のレーザ硬化アブレーション閾値よりも高い強度を提供するように選択される、手段と、

該表面の少なくとも1つの第2の位置のうちの1つに該レーザビームを集束させるように該材料を配置する、該平行移動テーブルに結合された手段であって、該1つの第2の位置が、該複数の第1の位置のうちの隣接する2つの間にある、手段と、

該レーザビームの多数のパルスを該第2の所定レベルのビームエネルギーで当てて、該1つの第2の位置の該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴のうちの1つを形成する手段と、を含む装置。

【請求項9】 前記少なくとも1つの第2の位置が複数の第2の位置を含み、該複数の第2の位置のそれぞれが、前記複数の第1の位置のうちの隣接する2つの間にあり、前記装置は、

前記レーザビームの前記パルスエネルギーを前記第2の所定レベルよりも高い第3の所定レベルに設定する手段と、

前記表面の少なくとも1つの第3の位置のうちの1つに該レーザビームを集束させるように、前記材料を配置する手段であって、該1つの第3の位置が、該複数の第1の位置のうちの1つと、該複数の第2の位置のうちの隣接する1つの間にある、手段と、

該レーザビームの多数のパルスを当てて該1つの第3の位置の該材料の該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴のうちの1つを形成する手段と、をさらに含む、請求項8に記載の装置。

【請求項10】 前記レーザビームがTE<sub>m</sub>,sモードで発振する、請求項8に記載の装置。

【請求項11】 前記レーザビームがある波長を有し、該レーザビームの前記エネルギーレベルが、該レーザビームの前記穿孔部分を該レーザビームの該波長よりも小さい直径に規定するために設定される、請求項8に記載の装置。

【請求項12】 前記レーザビームが775ナノメートルの波長を有し、該レーザビームの前記穿孔部分が約500nmの直径を有する、請求項11に記載の装置。

【請求項13】 前記パルスエネルギーの前記第2の所定レベルが、該パルスエネルギーの前記第1の所定レベルよりも高い、請求項8に記載の装置。

【請求項14】 前記レーザビームの前記パルスエネルギーが、1ナノジュールと1マイクロジュールとの間である、請求項8に記載の装置。

【請求項15】 請求項1に記載の方法によって形成された複数の穴を有する基板を含むフォトニック結晶。

【請求項16】 前記基板が誘電材料を含む、請求項15に記載のフォトニック結晶。

【請求項17】 前記基板が多層誘電材料を含む、請求項15に記載のフォトニック結晶。

【請求項18】 前記多層誘電材料がシリコン層および二酸化シリコン層を含む、請求項17に記載のフォトニック結晶。

【請求項19】 前記複数の穴が線形アレイの穴であり、前記フォトニック結晶が一次元のフォトニック結晶である、請求項15に記載のフォトニック結晶。

【請求項20】 前記複数の穴が線形の穴のマトリックスであり、前記フォトニック結晶が二次元フォトニック結晶である、請求項15に記載のフォトニック結晶。

【請求項21】 超高速パルスレーザ、およびレーザビームが通過する出力カプラを含むレーザ加工装置を用いて、材料に複数の穴を開ける方法であって、

a. 該レーザビームのパルスエネルギーを第1の所定レベルに設定する工程と、

b. 該材料の表面の複数の第1の位置のうちの1つに該レーザビームを集束させるように、該出力カプラを配置する工程と、

c. 該レーザビームの多数のパルスを当てて該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴のうちの1つを形成する工程と、

d. 該第1の位置のうちのそれぞれ異なる1つに該出力カプラを配置して、該複数の穴の一部が該複数の第1の位置に形成されるまで該工程bおよびcを繰り返す工程と、

e. 該レーザビームの該パルスエネルギーを第2の所定レベルに設定する工程と、

f. 該表面の少なくとも1つの第2の位置のうちの1つに該レーザビームを集束させるように、該出力カプラを配置する工程であって、該少なくとも1つの第2の位置のうちの該1つが該複数の第1の位置のうちの隣接する2つの間にある、工程と、

g. 該レーザビームの多数のパルスを当てて該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴のうちの1つを形成する工程と、を含む方法。

【請求項22】 超高速パルスレーザビームを用いて材料に複数の穴を開ける方法であって、

a) 該レーザビームのパルスエネルギーを所定レベルに設定する工程であって、該所定レベルが、該レーザビームの穿孔部分内に該材料のアブレーション閾値よりも高い強度を提供するように選択される、工程と、

b) 該材料の表面の複数の第1の位置のうちの1つに該レーザビームを集束させるように、該材料を配置する工程と、

c) 該レーザビームの第1の所定数のパルスを当てて該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴のうちの1つを形成する工程と、

d) 該表面の該複数の第1の位置の全てが該複数の穴のうちの1つを有するまで該工程b)およびc)を繰り返す工程と、

e) 該表面の少なくとも1つの第2の位置のうちの1つに該レーザビームを集束させるように、該材料を配置する工程であって、該1つの第2の位置が、該複数の第1の位置のうちの隣接する2つの間にある、工程と、

f) 該第1の所定数よりも大きい第2の所定数のパルスを当てて該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴のうちの1つを形成する工程と、を含む方法。

【請求項23】 前記少なくとも1つの第2の位置が複数の第2の位置を含み、該複数の第2の位置のそれぞれが、前記複数の第1の位置のうちの隣接する2つの間にあり、前記方法は、

g) 前記表面の該複数の第2の位置の全てが前記複数の

穴のうちの1つを有するまで前記工程e)およびf)を繰り返す工程と、

h) 該表面の少なくとも1つの第3の位置のうちの1つに前記レーザビームを集束させるように、前記材料を配置する工程であって、該1つの第3の位置が、該複数の第1の位置のうちの1つと、該複数の第2の位置のうちの隣接する1つとの間にある、工程と、

i) 該レーザビームの第3の所定数のパルスを当てて該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴のうちの1つを形成する工程であって、該第3の所定数が前記第2の所定数より大きい、工程と、をさらに含む、請求項22に記載の方法。

【請求項24】 前記レーザビームがTEM<sub>00</sub>モードで発振するように前記レーザを動作させる工程をさらに含む、請求項22に記載の方法。

【請求項25】 前記レーザビームがある波長を有し、該レーザビームの前記パルスエネルギーを前記所定レベルに設定する前記工程が、該レーザビームの前記穿孔部分に該レーザビームの該波長よりも小さい直径を有するように規定するために、該レーザビームの該パルスエネルギーを設定する工程を含む、請求項22に記載の方法。

【請求項26】 前記レーザビームが775ナノメートルの波長を有し、前記レーザビームの前記パルスエネルギーを設定する前記工程が、該ビームの前記穿孔部分を約500nmの直径を有するように規定する、請求項25に記載の方法。

【請求項27】 前記レーザビームの前記パルスエネルギーを前記所定レベルに設定する前記工程が、該パルスエネルギーを1ナノジュールと1マイクロジュールとの間に設定する工程を含む、請求項22に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】(発明の背景) 半導体および通信の分野で多くの新たな材料加工用途がサブミクロンの加工能力を必要としている。この能力、つまり、電子ビームエッチング、プラズマエッチング、X線リソグラフィ、および超高速パルスレーザでの加工(レーザ加工)等を有するか、またはすぐにするようになる多くの加工技術が存在する。これらの技術のうち、レーザ加工のみが標準的な環境、およびインサイチュでのモニタリングにおいて動作するという利点を提供する。

【0002】超高速パルスレーザの重要な特徴は、レーザの最小回折限界である、スポットサイズよりも小さな表面領域をアブレートする能力である。この能力は、パルスの間の熱の伝播を実質的に許容しないパルスの短さ、およびガウス空間ビームプロフィールによって生み出される、パルスのエネルギーを慎重に制御することにより、ビームの中心の小さな領域においてのみ強度を、加工されている材料のアブレーション閾値よりも高くすることが可能である。パルスが継続している間の熱伝導

がないために、その小さな領域のみがアブレートされる。このようにして、穴はレーザの波長よりも小さな直径にまでレーザ加工され得、例えば、約500nmの直径を有する穴が、775nmフェムト秒のパルスレーザを用いて開けられる。幾何学的に言うと、これらの穴を500nm程度の狭い間隔で形成することが可能である。しかしながら、穴が同じレーザで一方の端から他方の端まで1つづつ開けられる場合、連続する穴をレーザ加工する従来の方法では、穴の中心間の間隔(ピッチ)は、この限界に近づき得ない。

【0003】以下の実施例はこの問題を例証する。最初の穴が所与のレーザ強度および所与のレーザパルス数で開けられるものと仮定する。レーザ強度は、レーザが誘発するアブレーションが表面に形成されるビームスポットの中心部のみで起こり、戦慄閾値に達するように選択される。このアブレーションにより穴が開く。しかしながら、たとえ、照射される周辺部がアブレーション閾値に達しなくても、その次のレーザ照射におけるアブレーション閾値を増加する材料特性の変化を受ける。この、レーザ照射が誘発する材料の硬化現象(以下、レーザ硬化)は、硬化された部分に同じレーザ強度およびパルス数を用いた際、レーザで硬化された領域には、新たな穴を開け得ないことを意味する。それゆえ、穿孔の確実性および再現性が悪化する。この問題は、正確なサブミクロンのピッチで配置される多数の実質的に同一の穴が望まれる、フォトニック結晶等のデバイスで特に重要である。

【0004】(発明の要旨)

1. 超高速パルスレーザビームを用いて、材料に複数の穴を開ける方法であって、a) 該レーザビームのパルスエネルギーを第1の所定レベルに設定する工程であって、該第1の所定レベルが、該レーザビームの穿孔部分内に該材料のアブレーション閾値よりも高い強度を提供するように選択される、工程と、b) 該材料の表面の複数の第1の位置のうちの1つに該レーザビームを集束させるように、該材料を配置する工程と、c) 該レーザビームの多数のパルスを用いて該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴のうちの1つを形成する工程と、d) 該表面の該複数の第1の位置のうちの1つを有するまで該工程b)およびc)を繰り返す工程と、e) 該レーザビームの該パルスエネルギーを第2の所定レベルに設定する工程であって、該第2の所定レベルが、該レーザビームの該穿孔部分内に該材料のレーザ硬化アブレーション閾値よりも高い強度を提供するように選択される、工程と、f) 該表面の少なくとも1つの第2の位置のうちの1つに該レーザビームを集束させるように、該材料を配置する工程であって、該1つの第2の位置が、該複数の第1の位置のうちの隣接する2つの間にある、工程と、g) 該レーザビームの多数のパルスを用いて該表面をアブレートすること

により、該表面に該複数の穴のうちの1つを形成する工程と、を包含する方法。

【0005】2. 前記少なくとも1つの第2の位置が複数の第2の位置を含み、該複数の第2の位置のそれぞれが、前記複数の第1の位置のうちの隣接する2つの間にあり、前記方法は、h) 前記表面の該複数の第2の位置の全てが前記複数の穴のうちの1つを有するまで工程f) およびg) を繰り返す工程と、i) 前記レーザビームの前記パルスエネルギーを、前記第2の所定レベルよりも高い第3の所定レベルに設定する工程と、j) 該表面の少なくとも1つの第3の位置のうちの1つに該レーザビームを集束させるように、前記材料を配置する工程であって、該1つの第3の位置が、該複数の第1の位置のうちの1つと、該複数の第2の位置のうちの隣接する1つとの間にある、工程と、k) 該レーザビームの多数のパルスで当てる該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴のうちの1つを形成する工程とをさらに包含する、項目1に記載の方法。

【0006】3. 前記レーザビームがTEM<sub>00</sub>モードで発振するようにレーザを動作させる工程をさらに包含する、項目1に記載の方法。

【0007】4. 前記レーザビームがある波長を有し、該レーザビームの前記パルスエネルギーを前記第1の所定レベルに設定する前記工程は、該レーザビームの前記穿孔部分が該レーザビームの該波長よりも小さな直径を有するように規定するために、該レーザビームの該パルスエネルギーを設定する工程を含む、項目1に記載の方法。

【0008】5. 前記レーザビームが775ナノメートルの波長を有し、該レーザビームの前記パルスエネルギーを設定する前記工程は、該レーザビームの前記穿孔部分を約500nmの直径を有するように規定する、項目4に記載の方法。

【0009】6. 前記レーザビームの前記パルスエネルギーを前記第2の所定レベルに設定する前記工程が、該パルスエネルギーの該第2の所定レベルを、該パルスエネルギーの前記第1の所定レベルよりも高いレベルに設定する工程を含む、項目1に記載の方法。

【0010】7. 前記レーザビームの前記パルスエネルギーを前記第1の所定レベルに設定する前記工程が、該パルスエネルギーを1ナノジュールと1マイクロジュールとの間に設定する工程を含む、項目1に記載の方法。

【0011】8. 材料に複数の穴を開ける装置であって、レーザビームを提供する超高速パルスレーザと、該超高速パルスレーザに結合された、該レーザビームのパルスエネルギーを第1の所定レベルに設定する手段であって、該第1の所定レベルが、該レーザビームの穿孔部分内に該材料のアブレーション閾値よりも高い強度を提供するように選択される、手段と、該材料の表面の複数の第1の位置のそれぞれに該レーザビームを集束させる

ように、該材料を該複数の第1の位置に配置する、平行移動テーブルと、該レーザビームの多数のパルスで当てる、該第1の複数の位置のそれぞれの該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴の第1の部分を形成する手段と、該レーザビームの該パルスエネルギーを第2の所定レベルに設定する手段であって、該第2の所定レベルが、該レーザビームの該穿孔部分内に該材料のレーザ硬化アブレーション閾値よりも高い強度を提供するように選択される、手段と、該表面の少なくとも1つの第2の位置のうちの1つに該レーザビームを集束させるように該材料を配置する、該平行移動テーブルに結合された手段であって、該1つの第2の位置が、該複数の第1の位置のうちの隣接する2つの間にある、手段と、該レーザビームの多数のパルスを該第2の所定レベルのビームエネルギーで当てる、該1つの第2の位置の該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴のうちの1つを形成する手段とを含む装置。

【0012】9. 前記少なくとも1つの第2の位置が複数の第2の位置を含み、該複数の第2の位置のそれぞれが、前記複数の第1の位置のうちの隣接する2つの間にあり、前記装置は、前記レーザビームの前記パルスエネルギーを前記第2の所定レベルよりも高い第3の所定レベルに設定する手段と、前記表面の少なくとも1つの第3の位置のうちの1つに該レーザビームを集束させるように、前記材料を配置する手段であって、該1つの第3の位置が、該複数の第1の位置のうちの1つと、該複数の第2の位置のうちの隣接する1つとの間にある、手段と、該レーザビームの多数のパルスを当てる該1つの第3の位置の該材料の該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴のうちの1つを形成する手段とをさらに含む、項目8に記載の装置。

【0013】10. 前記レーザビームがTEM<sub>00</sub>モードで発振する、項目8に記載の装置。

【0014】11. 前記レーザビームがある波長を有し、該レーザビームの前記エネルギーレベルが、該レーザビームの前記穿孔部分を該レーザビームの該波長よりも小さい直径に規定するために設定される、項目8に記載の装置。

【0015】12. 前記レーザビームが775ナノメートルの波長を有し、該レーザビームの前記穿孔部分が約500nmの直径を有する、項目11に記載の装置。

【0016】13. 前記パルスエネルギーの前記第2の所定レベルが、該パルスエネルギーの前記第1の所定レベルよりも高い、項目8に記載の装置。

【0017】14. 前記レーザビームの前記パルスエネルギーが、1ナノジュールと1マイクロジュールとの間である、項目8に記載の装置。

【0018】15. 項目1に記載の方法によって形成された複数の穴を有する基板を含むフォトリソグラフィ。

【0019】16. 前記基板が誘電材料を含む、項目1

5に記載のフォトリソグラフィ。

【0020】17. 前記基板が多層誘電材料を含む、項目15に記載のフォトリソグラフィ。

【0021】18. 前記多層誘電材料がシリコン層および酸化シリコン層を含む、項目17に記載のフォトリソグラフィ。

【0022】19. 前記複数の穴が線形アレイの穴であり、前記フォトリソグラフィが二次元フォトリソグラフィである、項目15に記載のフォトリソグラフィ。

【0023】20. 前記複数の穴が線形の穴のマトリックスであり、前記フォトリソグラフィが二次元フォトリソグラフィである、項目15に記載のフォトリソグラフィ。

【0024】21. 超高速パルスレーザ、およびレーザビームが通過する出力カプラを含むレーザ加工装置を用いて、材料に複数の穴を開ける方法であって、a. 該レーザビームのパルスエネルギーを第1の所定レベルに設定する工程と、b. 該材料の表面の複数の第1の位置のうちの1つに該レーザビームを集束させるように、該出力カプラを配置する工程と、c. 該レーザビームの多数のパルスを当てて該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴のうちの1つを形成する工程と、d. 該第1の位置のうちのそれぞれ異なる1つに該出力カプラを配置して、該複数の穴の一部が該複数の第1の位置に形成されるまで該工程bおよびcを繰り返す工程と、e. 該レーザビームの該パルスエネルギーを第2の所定レベルに設定する工程と、f. 該表面の少なくとも1つの第2の位置のうちの1つに該レーザビームを集束させるように、該出力カプラを配置する工程であって、該少なくとも1つの第2の位置のうちの該1つが該複数の第1の位置のうちの隣接する2つの間にある、工程と、g. 該レーザビームの多数のパルスを当てて該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴のうちの1つを形成する工程とを含む方法。

【0025】22. 超高速パルスレーザビームを用いて材料に複数の穴を開ける方法であって、a) 該レーザビームのパルスエネルギーを所定レベルに設定する工程であって、該所定レベルが、該レーザビームの穿孔部分内に該材料のアブレーション閾値よりも高い強度を提供するように選択される、工程と、b) 該材料の表面の複数の第1の位置のうちの1つに該レーザビームを集束させるように、該材料を配置する工程と、c) 該レーザビームの第1の所定数のパルスを当てて該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴のうちの1つを形成する工程と、d) 該表面の複数の第1の位置のうちの1つが該複数の穴のうちの1つを有するまで該工程b)およびc)を繰り返す工程と、e) 該表面の少なくとも1つの第2の位置のうちの1つに該レーザビームを集束させるように、該材料を配置する工程であって、該1つの第2の位置が、該複数の第1の位置のうちの隣接する2つの間にある、工程と、f) 該第1の所定数よりも大

き第2の所定数のパルスを当てて該表面をアブレートすることにより、該表面に該複数の穴のうちの1つを形成する工程とを含む方法。

【0026】23. 前記少なくとも1つの第2の位置が複数の第2の位置を含み、該複数の第2の位置のそれぞれが、この問題に対する解決手段は、本発明の例示的なレーザ加工処理であり、穴どうしをより近くに形成することにより、波長以下の穴の中心間隔(ピッチ)に達することが可能となる。

【0027】この例示的なプロセスの第1の工程は、材料サンプルの表面の穴の位置を、いずれのグループにおける2つの穴が、レーザビームのスポットサイズよりも小さいピッチで形成することがないように選択された2つのグループに分けることである。次に、レーザビームのパルスエネルギーを、表面に所望の直径の穴を開けるように選択された、所定レベルに設定する。そして、レーザビームを表面の第1グループの穴の位置に集束するようにサンプルを配置し、多数のレーザパルスが表面をアブレートすることにより、表面に穴を形成する。このプロセスは、第1グループの各穴の位置に対して繰り返される。

【0028】この時点で、レーザビームのパルスエネルギーを、レーザ硬化された表面に所望の直径の穴を開けるように選択された、第2の所定レベルに設定する。次いで、レーザビームを表面の第2グループの穴の位置に集束するようにサンプルを配置し、多数のレーザパルスが表面をアブレートすることにより、表面に穴を形成する。あるいは、ビームのパルスエネルギーを同じレベルに維持し、より多くの数のパルスをレーザ硬化された表面に当ててもよい。このプロセスは、第2グループの各穴の位置に対して繰り返される。

【0029】あるいは、サンプルではなく、レーザビームを移動してもよい。

【0030】本発明の別の局面は、上記の方法により、材料サンプルに形成された複数の穴を含む例示的なフォトリソグラフィである。

【0031】(発明の詳細な説明) 本発明は、実質的に均一なサイズおよび形状を有し、レーザビームの波長よりも小さな直径を有する小さな穴を開けるためのレーザ材料加工用途で用いられる方法を記載する。現在、フェムト秒のレーザパルスを用いるフォトリソグラフィバンドギャップ材料の加工等の多くのレーザ材料加工用途が、サブミクロンの加工能力を必要としている。図1Aは、材料サンプル100にレーザ加工された、間隔が広い穴の列102を示す。これらの穴は、穴を開けるために用いられる超高速レーザの波長よりも小さな直径dを有するように形成され得る。例えば、使用されるレーザが775 nmフェムト秒レーザである場合、図1Aは、2 μmのピッチpで、500 nmの直径を有し得る、幾何学的に言うと、これらの穴を500 nm程度の狭い間隔で形

成することが可能である。しかしながら、穴がレーザ加工されるときに、レーザ硬化領域104も、サンプルの表面に沿って、ビーム幅 $w$ と等しい直径で形成される。本実施例において、 $w$ は1.5  $\mu\text{m}$ である。レーザ硬化領域の材料特性は表面の硬化されていない部分とは著しく異なり得るので、少なくともその一部が表面のレーザ硬化領域内に開けられた穴は、硬化されていない部分に開けられた穴とは大きく異なる特質を有し得る。

【0032】図1Bは例示的な材料サンプルを示す。サンプルにレーザ加工された穴は、その穴が一直線上に連続して開けられる場合、最初の穴に続く各穴の領域の交差部106近傍の部分が、表面のレーザ硬化領域に含まれるように狭い間隔で形成される。図1Aを参照して示した、上記と同じ例示的なレーザビームパラメータを用いると、図1Bのピッチ $p$ は750 nmである。

【0033】このようにして形成された穴は不完全であるか、または形が損なわれているかもしれない。特に、正確な許容差が望まれるフォトニック結晶等の用途では望ましくない。レーザ硬化領域の最小直径がレーザの回折限界であるビームスポットサイズにより決定されるので、波長よりも小さなピッチの実質的に同一の穴を、連続した穿孔パターンを用いてレーザ加工することは、多くの材料において不可能であり得る。

【0034】図2は、本発明で用いられるレーザ加工装置の例示的な実施形態を示す。超短波パルスレーザ204、例えば、775 nmフェムト秒のレーザが、望ましくはTE<sub>M</sub>0<sub>z</sub>モードで発振するレーザビーム200を生成する。このレーザビームは、レーザ加工装置の構成要素間の、介在する空気中を通るか、または光ファイバー(図示せず)に沿って伝播され得る。レーザから出射された後、ビームは、可変強度減衰器およびシャッターアセンブリ206を通過し、シャッター(図示せず)および可変強度減衰器(図示せず)を含む。シャッターがパルス数を制御し、可変強度減衰器はビームのパルスエネルギーを制御する。半波長板および交差偏光子が、例示的な可変強度減衰器を形成し得る。この組み合わせによって、所望のレーザ強度および当てべきパルス数を選択することが可能である。本発明の例示的な実施形態は、775 nmの波長を有する超短波パルスレーザを用いる。この可変強度減衰器によって、レーザのパルスエネルギーが1ナノジュール〜1マイクロジュールに設定され得る。

【0035】レーザビームは、次いで、加工するサンプル100の表面に集束される。ビーム200をワークピース100に集束させるために、作動距離が長く開口率が高い、顕微鏡の対物レンズ等の出力カプラ202が用いられ得る。サンプル100は、ナノメータの解像度を有する精密なXYZ平行移動ステージ210に取り付けられ得る。光カプラ202に対してXYZステージ210を移動させることによって、図2の集束されたレー

ザビーム208で示すように、サンプル上の任意のスポットにレーザビームを正確に集束し得る。

【0036】図5にチャートで示す本発明の例示的な方法は、図2に示す種類のレーザ加工装置を用いて、波長よりも小さな間隔を有する穴を開けるための手順である。これは、新たな穿孔パターンを用いて達成される。

【0037】第1の工程500は材料サンプル100上の位置を隔てることであり、穴は2つのグループに分けて開けられる。これらのグループは、所与のグループの2つの穴が、一方の穴の加工中に形成されたレーザ硬化領域が他方の穴の一部と重なるほど互いに近くないように選択される必要がある。厳密には、これは、同じグループの任意の2つの穴の間隔が、レーザ硬化領域の幅と少なくとも等しいことを意味する。一列の穴に対して、これらのグループは、穴に連続した番号をつけることによって、通常は選択され得、偶数の番号を付けられた穴が一方のグループとなり、奇数の番号を付けられた穴が他方のグループとなる。一列の穴が2つのグループに分けられた後も、一方のグループの穴が互いに近接している場合、3つのグループが形成され得ることが企図されている。

【0038】次の工程502で、レーザビームのパルスエネルギーが、レーザビームの集束された空間プロフィールの中心領域内に、硬化されていない材料のアブレーション閾値よりも高いレーザビーム強度を提供するレベルに設定される。この強度がアブレーション閾値を越えるレーザビームプロフィールの面積は、望ましくは、加工される穴1個分の面積と同じである。

【0039】次に、図5に示す例示的な実施形態において、サンプルは、レーザビームがサンプルの表面の第1のグループの穴の位置のうちの1つに集束されるように配置される(工程504)。サンプルは、表面に穴を適切に配置するためにXおよびY方向に正確に配置され、そして、表面にレーザビームを集束させるようにZ方向に正確に配置される。サンプルを動かす代わりに、作動距離が長い顕微鏡の対物レンズ202を操作して、レーザビームを集束および/または配置し得ることが企図されている。レーザビームを配置するために、顕微鏡の対物レンズを移動する場合、レーザビームが、レーザ加工装置の構成要素間を光ファイバー内で伝播され得ることが望ましい。

【0040】所定数のパルスが、表面506をアブレーションするために当てられる。この数は、硬化されていない部分に所望の穴のサイズを導入するために計算され得る。あるいは、穿孔プロセスが、適切な数のパルスが通った時を確認するために、インサイチュでモニターされ得る。このようにして、非常に精度が高い穴の深さが達成され得る。

【0041】工程508での判定により、前の2つの工程504および506が、第1のグループ全ての穴が開



13

けられるまで繰り返される。

【0042】表面の第1の位置の全てが穴を有すると、プロセスは工程510に進む。レーザビームのバルスエネルギーが、レーザ硬化された材料のアブレーション閾値よりも高いレーザビーム強度を提供する第2のレベルに設定される。この強度がアブレーション閾値を超えるレーザビームプロフィールの面積は、望ましくは、加工される穴の1個分の面積と同じである。

【0043】次に、サンプルは、レーザビームがサンプルの表面の第2グループの穴の位置のうちの1つに集束

10 されるように配置される(工程512)。サンプルは工程504と同様に配置される。

【0044】レーザビームの多数のバルスが、次いで、表面514をアブレートするために当てられる。この数は、レーザ硬化部分に望ましい穴のサイズを導入するために計算され得るか、または工程506に関して既述したようにモニターされる。

【0045】これらの最後の2つの工程512および514は、第2グループの全ての穴が開けられるまで繰り返される。第3グループの穴の位置がある場合には、バルスエネルギーは、レーザビームに2度当てられた材料に対して、第3グループの穴を、最初の2つのグループと同様の方法で開けるために再度増加される。

【0046】この方法は、レーザ硬化された周辺部が存在し得、且つ従来の穿孔方式を連続して用いたときに確実な穿孔結果を妨げ得る。レーザ加工プロセスのいずれにも適用できる。図3に示す本発明の例示的な実施形態は、フォトニック結晶を生成するために、基板300にフェムト秒のバルスで穴102を開ける工程を伴う。この基板は、望ましくは、誘電材料または二酸化シリコン上のシリコン構造等の多層構造で形成される。図3に示す例示的なフォトニック結晶は、正方形のパターンに配列された穴を有する二次元のフォトニック結晶構造として形成されている。この正方形のパターンは、単に二次元のフォトニック結晶の1つの可能なパターンにすぎない。六角形のパターン等の他のパターンもまた、本発明のレーザ加工法を用いて形成され得る。1次元のフォトニック結晶構造も同様に、本発明のレーザ加工プロセスを用いて形成され得ることが企図されている。

【0047】図4は、図5を参照して上述した例示的なレーザ加工プロセスの別の用途を示す。図4の材料サンプル100は、表面にレーザ加工された溝402を有す

14

る。この溝は、本発明に従って、穴の直径の一部をピッチとして、波長よりも小さい直径の穴を連続して形成することによって刻まれ得るので、穴が重なり合い、実質的に滑らかな溝を形成する。このような溝を形成するために、穴の位置を少なくとも3つのグループに分けることが望ましい。

【0048】本発明を例示的な実施形態に関して述べたが、本発明は、添付の特許請求の範囲内で上述のとおりに行なわれ得ることが企図されている。また、添付の特許請求の範囲によって規定される本発明の範囲から逸脱しない、多くの他の変形例が存在することを、当業者は理解する。

【0049】結論として、本発明は、超高速バルスレーザを用いるレーザ加工の方法を提供する。本発明に従って、レーザの波長よりも小さなピッチの複数の穴が材料サンプルに開けられる。確実且つ再現可能な穿孔が、第1の集合の穴に隣接する穴について表面のレーザ硬化を避けるために間隔を置いた表面に、第1のバルスエネルギーで多数のバルスを当てる例示的な穿孔のシーケンスを通して達成される。次に、バルス数を増加するか、またはレーザビームのエネルギーを増加させて、第1の集合の穴の間に穴を開ける。例示的なレーザ加工プロセスは、他の用途の中でも特に、1次元および二次元双方のフォトニック結晶を製造するために用いられ得る。

【図面の簡単な説明】

【図1A】図1Aは、レーザ加工されたサンプルの一部分における、間隔を広く置いた穴、および関連するレーザ硬化領域を示す上面図である。

【図1B】図1Bは、レーザ加工されたサンプルの一部分における、間隔を狭く置いた穴、および関連するレーザ硬化領域を示す上面図である。

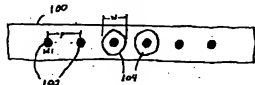
【図2】図2は、本発明の例示的なレーザ加工装置を示すブロック図である。

【図3】図3は、本発明の例示的なレーザ加工法によって形成された例示的なフォトニック結晶を示す上面図である。

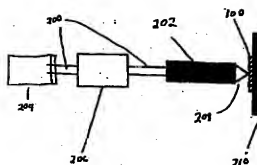
【図4】図4は、本発明の例示的なレーザ加工法を用いて、材料の一部に刻まれたレーザ加工された溝を示す上面図である。

【図5】図5は、本発明の例示的なレーザ加工法を示すフローチャートである。

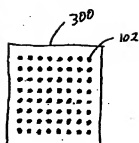
【図1A】



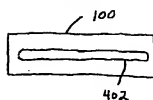
【図2】



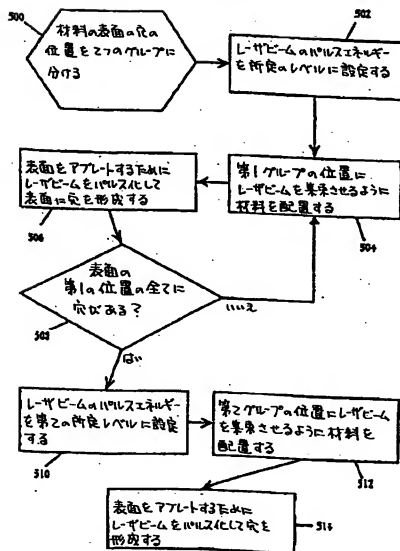
【図3】



【図4】



【図5】



フロントページの続き

Fターム(参考) 4E068 AF01 CA02 CA03 CA14 CD05  
CD14 CX01

## 【外国語明細書】

## 1. Title of Invention

METHOD AND APPARATUS FOR DRILLING HOLES WITH SUB-WAVELENGTH PITCH  
WITH LASER

## 2. Claims

1. A method to drill a plurality of holes in a material using an ultra-fast pulsed laser beam, comprising the steps of:

a) setting a pulse energy of the laser beam to a first predetermined level, selected to provide an intensity greater than an ablation threshold of the material within a hole-drilling portion of the laser beam;

b) positioning the material to focus the laser beam on one of a plurality of first positions on a surface of the material;

c) applying a number of pulses of the laser beam to ablate the surface, thereby forming one of the plurality of holes in the surface;

d) repeating steps b) and c) until all of the plurality of first positions on the surface have one of the plurality of holes;

e) setting the pulse energy of the laser beam to a second predetermined level, selected to provide an intensity greater than a laser hardened ablation threshold of the material within the hole-drilling portion of the laser beam;

f) positioning the material to focus the laser beam on one of at least one second position on the surface, wherein the one second position is between two adjacent ones of the plurality of first positions; and

g) applying a number of pulses of the laser beam to ablate the surface, thereby forming one of the plurality of holes in the surface.

2. A method according to claim 1 wherein the at least one second position includes a plurality of second positions, each of the plurality of second positions being between two adjacent ones of the plurality of first positions, the method further comprising the steps of:

h) repeating steps f) and g) until all of the plurality of second position on the surface have one of the plurality of holes;

i) setting the pulse energy of the laser beam to a third predetermined level, greater than the second predetermined level;

j) positioning the material to focus the laser beam on one of at least one third position on the surface, wherein the one third position is between one of the plurality of first positions and an adjacent one of the plurality of second positions; and

k) applying a number of pulses of the laser beam to ablate the surface, thereby forming one of the plurality of holes in the surface.

3. A method according to claim 1, further including the step of operating the laser such that the laser beam oscillates in the TEM<sub>0,0</sub> mode.

4. A method according to claim 1, wherein the laser beam has a wavelength and the step of setting the pulse energy of the laser beam to the first predetermined level includes the step of setting the pulse energy of the laser beam to define the hole-drilling portion of the laser beam to have a diameter less than the wavelength of the laser beam.

5. A method according to claim 4, wherein the laser beam has a wavelength of 775 nanometers and the step of setting the pulse energy of the laser beam defines the hole-drilling portion of the beam to have a diameter of approximately 500 nm.

6. A method according to claim 1, wherein the step of setting the pulse energy of the laser beam to the second predetermined level includes the step of setting the second predetermined level of pulse energy to a level that is greater than the first predetermined level of the pulse energy.

7. A method according to claim 1, wherein the step of setting the pulse energy of the laser beam to the first predetermined level includes the step of setting the pulse energy to be between 1 nanojoule and 1 microjoule.

8. Apparatus for drilling a plurality of holes in a material, comprising:

an ultrafast pulsed laser which provides a laser beam;

means, coupled to the ultrafast pulsed laser, for setting a pulse energy of the laser beam to a first predetermined level, selected to provide an intensity greater than an ablation threshold of the material within a hole-drilling portion of the laser beam;

a translation table which positions the material to a first plurality of positions to focus the laser beam at each of the first plurality of positions on a surface of the material;

means for applying a number of pulses of the laser beam to ablate the surface at each of the first plurality of positions to form a first portion of the plurality of holes in the surface;

means for setting the pulse energy of the laser beam to a second predetermined level, selected to provide an intensity greater than a laser hardened ablation threshold of the material within the hole-drilling portion of the laser beam;

means, coupled to the translation table for positioning the material to focus the laser beam on one of at least one second position on the surface, wherein the one second position is between two adjacent ones of the first plurality of positions; and

means for applying a number of pulses of the laser beam at the second predetermined level of beam energy to ablate the surface at the one second position, thereby forming one of the plurality of holes in the surface.

9. Apparatus method according to claim 8 wherein the at least one second position includes a plurality of second positions, each of the plurality of second

positions being between two adjacent ones of the plurality of first positions, the apparatus further comprising:

means for setting the pulse energy of the laser beam to a third predetermined level greater than the second predetermined level;

means for positioning the material to focus the laser beam on one of at least one third position on the surface, wherein the one third position is between one of the plurality of first positions and an adjacent one of the plurality of second positions; and

means for applying a number of pulses of the laser beam to ablate the surface of the material at the one third position, thereby forming one of the plurality of holes in the surface.

10. Apparatus according to claim 8, wherein the laser beam oscillates in the TEM<sub>0,0</sub> mode.

11. Apparatus according to claim 8, wherein the laser beam has a wavelength and the energy level of the laser beam is set to define the hole-drilling portion of the laser beam to a diameter less than the wavelength of the laser beam.

12. Apparatus according to claim 11, wherein the laser beam has a wavelength of 775 nanometers and the hole-drilling portion of the beam to have a diameter of approximately 500 nm.

13. Apparatus according to claim 8, wherein the second predetermined level of pulse energy is greater than the first predetermined level of the pulse energy.

14. Apparatus according to claim 8, wherein the pulse energy of the laser beam is between 1 nanojoule and 1 microjoule.

15. A photonic crystal comprising a substrate having a plurality of holes formed by the method of claim 1.

16. The photonic crystal of claim 15, wherein the substrate includes a dielectric material.

17. The photonic crystal of claim 15, wherein the substrate includes a multi-layered dielectric material.

18. The photonic crystal of claim 17, wherein the multi-layered dielectric material includes a silicon layer and a silicon dioxide layer.

19. The photonic crystal of claim 15 wherein the plurality of holes is a linear array of holes and the photonic crystal is a one-dimensional photonic crystal.

20. The photonic crystal of claim 15 wherein the plurality of holes is a matrix of linear holes and the photonic crystal is a two-dimensional photonic crystal.

21. A method of drilling a plurality of holes in a material using a laser machining apparatus including an ultra-fast pulsed laser and an output coupler through which a laser beam passes, comprising the steps of:

a. setting a pulse energy of the laser beam to a first predetermined level;

b. positioning the output coupler to focus the laser beam on one of a plurality of first positions on a surface of the material;

c. applying a number of pulses of the laser beam to ablate the surface, thereby forming one of the plurality of holes in the surface;

d. repeating steps b. and c. to position the output coupler at respectively different ones of the first position until a portion of the plurality of holes have been formed at the plurality of first positions;

e. setting the pulse energy of the laser beam to a second predetermined level;



f. positioning the output coupler to focus the laser beam on one of at least one second position on the surface, wherein the one of the at least one second position is between two adjacent ones of the plurality of first positions;

g. applying a number of pulses of the laser beam to ablate the surface, thereby forming one of the plurality of holes in the surface.

22. A method to drill a plurality of holes in a material using an ultra-fast pulsed laser beam, comprising the steps of:

a) setting a pulse energy of the laser beam to a predetermined level, selected to provide an intensity greater than an ablation threshold of the material within a hole-drilling portion of the laser beam;

b) positioning the material to focus the laser beam on one of a plurality of first positions on a surface of the material;

c) applying a first predetermined number of pulses of the laser beam to ablate the surface, thereby forming one of the plurality of holes in the surface;

d) repeating steps b) and c) until all of the plurality of first positions on the surface have one of the plurality of holes;

e) positioning the material to focus the laser beam on one of at least one second position on the surface, wherein the one second position is between two adjacent ones of the plurality of first positions; and

f) applying a second predetermined number of pulses, greater than the first predetermined number, to ablate the surface, thereby forming one of the plurality of holes in the surface.

23. A method according to claim 22 wherein the at least one second position includes a plurality of second positions, each of the plurality of second

positions being between two adjacent ones of the plurality of first positions, the method further comprising the steps of:

g) repeating steps e) and f) until all of the plurality of second position on the surface have one of the plurality of holes;

h) positioning the material to focus the laser beam on one of at least one third position on the surface, wherein the one third position is between one of the plurality of first positions and an adjacent one of the plurality of second positions; and

i) applying a third predetermined number of pulses of the laser beam to ablate the surface, the third predetermined number being greater than the second predetermined number, thereby forming one of the plurality of holes in the surface.

24. A method according to item 22, further including the step of operating the laser such that the laser beam oscillates in the TEM<sub>0,0</sub> mode.

25. A method according to item 22, wherein the laser beam has a wavelength and the step of setting the pulse energy of the laser beam to the predetermined level includes the step of setting the pulse energy of the laser beam to define the hole-drilling portion of the laser beam to have a diameter less than the wavelength of the laser beam.

26. A method according to item 25, wherein the laser beam has a wavelength of 775 nanometers and the step of setting the pulse energy of the laser beam defines the hole-drilling portion of the beam to have a diameter of approximately 500 nm.

27. A method according to item 22, wherein the step of setting the pulse energy of the laser beam to the predetermined level includes the step of setting the pulse energy to be between 1 nanojoule and 1 microjoule.

### 3. Detailed Description of Invention

#### BACKGROUND OF THE INVENTION

Many emerging material processing applications in the semiconductor and communications fields require sub-micron processing capability. A number of competing technologies exist that either have, or will soon have, this capability, such as; electron beam etching, plasma etching, x-ray lithography, and machining with ultrafast pulse lasers (laser machining). Of these technologies, only laser machining provides the advantages of operation in a standard atmosphere and *in situ* monitoring.

An important feature of ultrafast pulse lasers is their capability to ablate surface regions smaller than their minimum, diffraction limited, spot size. This capability is created by the brevity of the pulse, which allows for essentially no spreading of heat during the pulse, and the Gaussian spatial beam profile. By carefully controlling the energy of a pulse, it is possible to raise the intensity of only a small region in the center of the beam above the ablation threshold for the material being machined. Because of the lack of heat conduction in the pulse duration, only the small region is ablated. In this way, holes may even be laser machined with diameters less than the wavelength of the laser, for example holes having a diameter of approximately 500nm may be drilled using a 775nm femtosecond pulse laser. Geometrically speaking, it is possible to space these holes as close as 500nm. When the holes are drilled one by one from one end to the other with the same laser, however, the previous method of laser machining a series of holes, the hole center-to-center spacing (pitch) cannot approach this limit.

The following example illustrates this problem. Assume that the first hole is drilled with certain laser intensity and a certain number of laser pulses. The laser intensity is chosen so that laser-induced ablation occurs only in the central portion of beam spot focused on the surface, where the breakdown threshold is reached. This ablation leads to hole drilling. Even though the surrounding area that is irradiated does not reach ablation threshold, however, it may undergo material property changes that increase the ablation threshold for subsequent laser irradiation. This phenomenon of laser irradiation-induced material hardening, laser hardening hereinafter, means that

using the same laser intensity and number of pulses on the hardened area, a new hole may not be drilled in the laser hardened region. Therefore the hole-drilling reliability and reproducibility suffers. This issue is of particular importance in a device, such as a photonic crystal, in which a large number of substantially identical holes placed with a precise sub-micron pitch are desired.

#### SUMMARY OF THE INVENTION

The present invention provides the following:

1. A method to drill a plurality of holes in a material using an ultra-fast pulsed laser beam, comprising the steps of:
  - a) setting a pulse energy of the laser beam to a first predetermined level, selected to provide an intensity greater than an ablation threshold of the material within a hole-drilling portion of the laser beam;
  - b) positioning the material to focus the laser beam on one of a plurality of first positions on a surface of the material;
  - c) applying a number of pulses of the laser beam to ablate the surface, thereby forming one of the plurality of holes in the surface;
  - d) repeating steps b) and c) until all of the plurality of first positions on the surface have one of the plurality of holes;
  - e) setting the pulse energy of the laser beam to a second predetermined level, selected to provide an intensity greater than a laser hardened ablation threshold of the material within the hole-drilling portion of the laser beam;
  - f) positioning the material to focus the laser beam on one of at least one second position on the surface, wherein the one second position is between two adjacent ones of the plurality of first positions; and
  - g) applying a number of pulses of the laser beam to ablate the surface, thereby forming one of the plurality of holes in the surface.

2. A method according to item 1 wherein the at least one second position includes a plurality of second positions, each of the plurality of second positions being between two adjacent ones of the plurality of first positions, the method further comprising the steps of:

h) repeating steps f) and g) until all of the plurality of second position on the surface have one of the plurality of holes;

i) setting the pulse energy of the laser beam to a third predetermined level, greater than the second predetermined level;

j) positioning the material to focus the laser beam on one of at least one third position on the surface, wherein the one third position is between one of the plurality of first positions and an adjacent one of the plurality of second positions; and

k) applying a number of pulses of the laser beam to ablate the surface, thereby forming one of the plurality of holes in the surface.

3. A method according to item 1, further including the step of operating the laser such that the laser beam oscillates in the TEM<sub>0,0</sub> mode.

4. A method according to item 1, wherein the laser beam has a wavelength and the step of setting the pulse energy of the laser beam to the first predetermined level includes the step of setting the pulse energy of the laser beam to define the hole-drilling portion of the laser beam to have a diameter less than the wavelength of the laser beam.

5. A method according to item 4, wherein the laser beam has a wavelength of 775 nanometers and the step of setting the pulse energy of the laser beam defines the hole-drilling portion of the beam to have a diameter of approximately 500 nm.

6. A method according to item 1, wherein the step of setting the pulse energy of the laser beam to the second predetermined level includes the step of setting the second predetermined level of pulse energy to a level that is greater than the first predetermined level of the pulse energy.

7. A method according to item 1, wherein the step of setting the pulse energy of the laser beam to the first predetermined level includes the step of setting the pulse energy to be between 1 nanojoule and 1 microjoule.

8. Apparatus for drilling a plurality of holes in a material, comprising:

an ultrafast pulsed laser which provides a laser beam;

means, coupled to the ultrafast pulsed laser, for setting a pulse energy of the laser beam to a first predetermined level, selected to provide an intensity greater than an ablation threshold of the material within a hole-drilling portion of the laser beam;

a translation table which positions the material to a first plurality of positions to focus the laser beam at each of the first plurality of positions on a surface of the material;

means for applying a number of pulses of the laser beam to ablate the surface at each of the first plurality of positions to form a first portion of the plurality of holes in the surface;

means for setting the pulse energy of the laser beam to a second predetermined level, selected to provide an intensity greater than a laser hardened ablation threshold of the material within the hole-drilling portion of the laser beam;

means, coupled to the translation table for positioning the material to focus the laser beam on one of at least one second position on the surface, wherein the one second position is between two adjacent ones of the first plurality of positions; and

means for applying a number of pulses of the laser beam at the second predetermined level of beam energy to ablate the surface at the one second position, thereby forming one of the plurality of holes in the surface.

9. Apparatus method according to item 8 wherein the at least one second position includes a plurality of second positions, each of the plurality of second

positions being between two adjacent ones of the plurality of first positions, the apparatus further comprising:

means for setting the pulse energy of the laser beam to a third predetermined level greater than the second predetermined level;

means for positioning the material to focus the laser beam on one of at least one third position on the surface, wherein the one third position is between one of the plurality of first positions and an adjacent one of the plurality of second positions; and

means for applying a number of pulses of the laser beam to ablate the surface of the material at the one third position, thereby forming one of the plurality of holes in the surface.

10. Apparatus according to item 8, wherein the laser beam oscillates in the TEM<sub>0,0</sub> mode.

11. Apparatus according to item 8, wherein the laser beam has a wavelength and the energy level of the laser beam is set to define the hole-drilling portion of the laser beam to a diameter less than the wavelength of the laser beam.

12. Apparatus according to item 11, wherein the laser beam has a wavelength of 775 nanometers and the hole-drilling portion of the beam to have a diameter of approximately 500 nm.

13. Apparatus according to item 8, wherein the second predetermined level of pulse energy is greater than the first predetermined level of the pulse energy.

14. Apparatus according to item 8, wherein the pulse energy of the laser beam is between 1 nanojoule and 1 microjoule.

15. A photonic crystal comprising a substrate having a plurality of holes formed by the method of claim 1.

16. The photonic crystal of item 15, wherein the substrate includes a dielectric material.
17. The photonic crystal of item 15, wherein the substrate includes a multi-layered dielectric material.
18. The photonic crystal of item 17, wherein the multi-layered dielectric material includes a silicon layer and a silicon dioxide layer.
19. The photonic crystal of item 15 wherein the plurality of holes is a linear array of holes and the photonic crystal is a one-dimensional photonic crystal.
20. The photonic crystal of item 15 wherein the plurality of holes is a matrix of linear holes and the photonic crystal is a two-dimensional photonic crystal.
21. A method of drilling a plurality of holes in a material using a laser machining apparatus including an ultra-fast pulsed laser and an output coupler through which a laser beam passes, comprising the steps of:
  - a. setting a pulse energy of the laser beam to a first predetermined level;
  - b. positioning the output coupler to focus the laser beam on one of a plurality of first positions on a surface of the material;
  - c. applying a number of pulses of the laser beam to ablate the surface, thereby forming one of the plurality of holes in the surface;
  - d. repeating steps b. and c. to position the output coupler at respectively different ones of the first position until a portion of the plurality of holes have been formed at the plurality of first positions;
  - e. setting the pulse energy of the laser beam to a second predetermined level;



f. positioning the output coupler to focus the laser beam on one of at least one second position on the surface, wherein the one of the at least one second position is between two adjacent ones of the plurality of first positions;

g. applying a number of pulses of the laser beam to ablate the surface, thereby forming one of the plurality of holes in the surface.

22. A method to drill a plurality of holes in a material using an ultra-fast pulsed laser beam, comprising the steps of:

a) setting a pulse energy of the laser beam to a predetermined level, selected to provide an intensity greater than an ablation threshold of the material within a hole-drilling portion of the laser beam;

b) positioning the material to focus the laser beam on one of a plurality of first positions on a surface of the material;

c) applying a first predetermined number of pulses of the laser beam to ablate the surface, thereby forming one of the plurality of holes in the surface;

d) repeating steps b) and c) until all of the plurality of first positions on the surface have one of the plurality of holes;

e) positioning the material to focus the laser beam on one of at least one second position on the surface, wherein the one second position is between two adjacent ones of the plurality of first positions; and

f) applying a second predetermined number of pulses, greater than the first predetermined number, to ablate the surface, thereby forming one of the plurality of holes in the surface.

23. A method according to item 22 wherein the at least one second position includes a plurality of second positions, each of the plurality of second

A solution to this problem is an exemplary laser machining process of the present invention, which allows closer placement of the holes to reach sub-wavelength center-to-center hole spacing (pitch).

The first step of this exemplary process is to separate the hole positions on the surface of the material sample into two groups selected so that no two members of either group have a pitch less than the laser beam spot size. Next the pulse energy of the laser beam is set to a predetermined level, selected to drill holes of the desired diameter in the surface. Then the sample is positioned so as to focus the laser beam on the surface at a hole position in the first group and a number of laser pulses are applied to ablate the surface, thereby forming a hole in the surface. The process is repeated for every hole position of the first group.

At this point the pulse energy of the laser beam is set to a second predetermined level, selected to drill holes of the desired diameter in the surface once it has been laser hardened. Then the sample is positioned so as to focus the laser beam on the surface at a hole position in the second group and a number of pulses of the laser beam are applied to ablate the surface, thereby forming a hole in the surface. Alternatively, the pulse energy of the beam may be maintained at the same level and a greater number of pulses applied to the laser hardened surface. The process is repeated for every hole position of the second group.

Alternatively, the laser beam may be moved rather than the sample.

Another aspect of the present invention is an exemplary photonic crystal comprising a plurality of holes formed in a material sample by the method described above.

#### DETAILED DESCRIPTION OF THE INVENTION

This invention describes a method used in laser material processing applications for drilling small holes, having substantially uniform size and shape which holes have a diameter that is less than the wavelength of the laser beam. Currently, many laser material processing applications such as the machining of photonic band gap crystals using femtosecond laser pulses require sub-micron processing capability. Figure 1A shows a row of widely separated holes 102, which have been laser machined into a material sample 100. These holes may be formed to have a diameter,  $d$ , less than the wavelength of the ultra-fast laser used to drill the holes. For example, if the laser

used is a 775nm femtosecond laser, the holes in Figure 1 may have a 500nm diameter with a pitch,  $p$ , of 2 $\mu$ m. Geometrically speaking, it is possible to space these holes as close as 500nm. However, when the holes are laser machined, the laser hardened regions 104 are also formed along the surface of the sample with a diameter equal to the beam width,  $w$ . In the example,  $w$  is 1.5 $\mu$ m. Because the material properties in the laser hardened regions may be significantly different from those in the *unhardened* portions of the surface, a hole drilled at least partially within the laser hardened regions of the surface may have very different characteristics than one drilled in an unhardened portion.

Figure 1B illustrates an exemplary material sample in which laser machined holes are closely spaced such that, if the holes are drilled one after another down the line, then each hole, after the first, has part of its area, near intersections 106, formed in a laser hardened region of the surface. Using the same exemplary laser beam parameters as above with reference to Figure 1A, the pitch,  $p$ , in Figure 1B is 750nm.

Holes formed in this manner may be incomplete or deformed, which is undesirable, particularly in applications, such as photonic crystals, where precise tolerances are desired. Because the minimum diameter of the laser hardened region is determined by the diffraction limited beam spot size of the laser, laser machining substantially identical holes with a sub-wavelength pitch using a sequential drilling pattern may not be possible in many materials.

Figure 2 illustrates an exemplary embodiment of a laser machining apparatus used in the present invention. The ultra-short pulse laser 204, for example a 775nm femtosecond laser, generates a laser beam 200, which desirably oscillates on a TEM<sub>0,0</sub> mode. The laser beam may be propagated between the components of the laser machining apparatus through the intervening air or along an optical fiber (not shown). After leaving the laser, the beam passes through a variable intensity attenuator and shutter assembly 206, which contains a shutter (not shown) and a variable intensity attenuator (not shown). The shutter controls the number of pulses and the variable intensity attenuator controls the pulse energy of the beam. A half-wave plate and crossed polarizers may form an exemplary variable intensity attenuator. With this combination, it is possible to select a desired laser intensity and number of pulses to be

applied. An exemplary embodiment of the invention uses an ultra-short pulse laser having a wavelength of 775nm. With the variable intensity attenuator, the pulse energy of the laser may be set between 1 nanojoule and 1 microjoule.

The laser beam is then focused onto the surface of the sample 100 to be machined. An output coupler 202, such as a long-working-distance, high numerical aperture microscope objective, may be employed to focus the beam 200 onto the workpiece 100. The sample 100 may be attached to a precise XYZ-translation-stage 210 with nanometer resolution. By moving the XYZ stage 210 relative to the optical coupler 202, one may precisely focus the laser beam to any spot on the sample, as illustrated by the focused laser beam 208 in Figure 2.

An exemplary method of the present invention, charted in Figure 5, is a procedure for drilling holes with sub-wavelength separations employing a laser machining apparatus of the sort illustrated in Figure 2. This is accomplished using a new drilling pattern.

The first step, 500, is to separate the positions on material sample 100 where holes are to be drilled into two groups. These groups should be chosen so that no two holes in a given group are close enough to each other that the laser hardened region formed during the machining of one hole will overlap part of the other hole. Mathematically this means that the separation between any two holes in the same group is at least equal to the width of a laser hardened region. For a line of holes the groups may usually be selected by numbering the holes sequentially with the even numbered holes being one group and the odd-numbered hole being the other. It is contemplated that, if the holes of one group are still too close together after separating the holes into two groups, then three group may be created.

At the next step 502, the pulse energy of the laser beam is set to a level that provides a laser beam intensity within the central area of focused spatial profile of the laser beam which is above the ablation threshold of the unhardened material. The area of the laser beam profile in which the intensity exceeds the ablation threshold is desirably the same as the area of one of the holes to be machined.

Next, in the exemplary embodiment shown in Figure 5, the sample is positioned such that the laser beam is focused on one of the first group of hole positions on the surface of the sample, step 504. The sample is precisely position in the X and Y directions to properly position the hole on the surface, and in the Z direction to focus the laser beam on the surface. It is contemplated that the long working length microscope objective 202 may be manipulated to focus and/or position the laser beam instead. It may be desirable for the laser beam to be propagated between components of the laser machining apparatus within an optical fiber in the case when the microscope objective is moved to position the laser beam.

A predetermined number of pulses are applied to ablate the surface 506. The number may be calculated to introduce a desired hole-size on non-hardened area. Alternatively the hole drilling process may be monitored *in situ* to ascertain when an appropriate number of pulses have passed. In this way, very high accuracy in hole depth may be attained.

The decision at step 508 causes the previous two steps, 504 and 506, to be repeated until all of the holes in the first group have been drilled.

Once all of the first positions on the surface have a hole, the process moves to step 510. The pulse energy of the laser beam is set to a second level that provides a laser beam intensity above the ablation threshold of the laser hardened material. The area of the laser beam profile in which the intensity exceeds the ablation threshold is desirably the same as the area of one of the holes to be machined.

Next, the sample is positioned such that the laser beam is focused on one of the second group of hole positions on the surface of the sample, step 512. The sample is positioned as in step 504.

The a number of pulses of laser beam are then applied to ablate the surface 514. The number may be calculated to introduce a desired hole-size on the laser hardened area or alternatively it may be monitored as previously described with regard to step 506.

These last two steps, 512 and 514, may be repeated until all of the holes of the second group have been drilled. If there is a third group of hole positions, the pulse energy may be increased again to account for the material being twice-exposed to the laser beam and the third group of holes drilled in a manner similar to the first two groups.

This method is applicable to any laser machining process where laser hardening of the surrounding areas may be present and may prevent reliable drilling results when employing prior drilling sequences. An exemplary implementation of the present invention, illustrated in Figure 3, involves drilling holes 102, with femtosecond pulses, in substrate 300 to fabricate a photonic crystal. This substrate may be desirably formed of a dielectric material or a multi-layer structure, such as a silicon-on-silicon dioxide structure. The exemplary photonic crystal illustrated in Figure 3 has been formed as a two-dimensional photonic crystal structure with the holes arranged in a square pattern. The square pattern is only one possible pattern for a two-dimensional photonic crystal. Other patterns, such as a hexagonal pattern, may also be formed using the present laser machining method. It is contemplated that a one-dimensional photonic crystal structure may be formed using the laser machining process of the present invention, as well.

Figure 4 illustrates an additional application of the exemplary laser machining process described above with reference to Figure 5. The material sample 100 in Figure 4 has had a groove 402 laser machined into its surface. This groove may be cut according to the present invention by forming a series of sub-wavelength diameter holes having a pitch which is a fraction of a hole diameter, so that the holes overlap forming a substantially smooth groove. To form such a groove, it may be desirable to separate the hole positions into at least three groups.

While the invention has been described in terms of an exemplary embodiment, it is contemplated that it may be practiced as described above within the scope of the appended claims. Also, it will be understood to one skilled in the art that a number of other modifications exist which do not deviate from the scope of the present invention as defined by the appended claims.

In conclusion, the present invention provides

A method of laser machining using an ultra-fast pulse laser is presented. According to the present invention a plurality of holes with a pitch less than the wavelength of the laser are drilled into a material sample. Reliable and reproducible hole drilling is accomplished through an exemplary drilling sequence which applies a number of pulses at a first pulse energy to the surface spaced to avoid laser hardening of the surface for adjacent holes of a first set of holes. Next, the number of pulses is increased or the energy of the laser beam is increased to drill holes that are interstitial to the first set of holes. The exemplary laser machining process may be used to produce both one-dimensional and two-dimensional photonic crystals, among other applications.

### BRIEF DESCRIPTION OF DRAWINGS

Figure 1A is a top view drawing illustrating widely spaced holes and an associated laser hardened region on a section of laser machined sample.

Figure 1B is a top view drawing illustrating closely spaced holes and an associated laser hardened region on a section of laser machined sample.

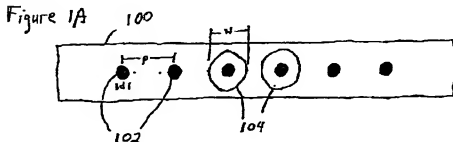
Figure 2 is a block diagram illustrating an exemplary laser machining apparatus of the present invention.

Figure 3 is a top view drawing illustrating an exemplary photonic crystal formed by an exemplary laser machining method of the present invention.

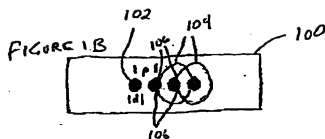
Figure 4 is a top view drawing illustrating a laser machined groove cut in a section of material using an exemplary laser machining method of the present invention.

Figure 5 is a flowchart diagram showing an exemplary laser machining method of the present invention.

[ 図 1 A ]

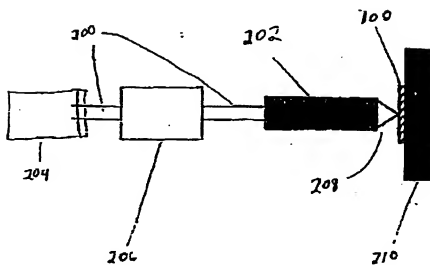


【図1B】



【図2】

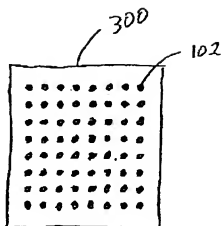
Figure 2





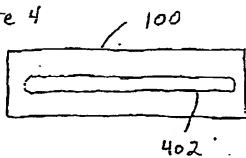
【図3】

Figure 3



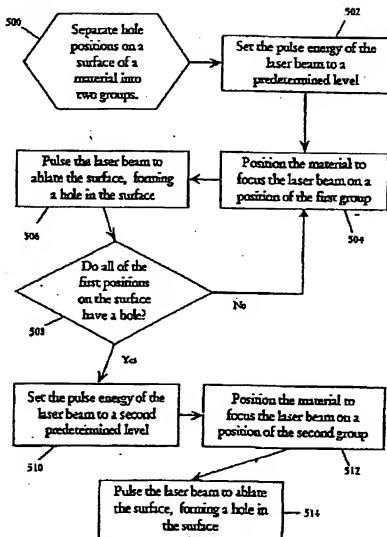
【図4】

Figure 4



【図5】

Figure 5



## 1. Abstract

A method of laser machining using an ultra-fast pulse laser is presented. According to the present invention a plurality of holes with a pitch less than the wavelength of the laser are drilled into a material sample. Reliable and reproducible hole drilling is accomplished through an exemplary drilling sequence which applies a number of pulses at a first pulse energy to the surface spaced to avoid laser hardening of the surface for adjacent holes of a first set of holes. Next, the number of pulses is increased or the energy of the laser beam is increased to drill holes that are interstitial to the first set of holes. The exemplary laser machining process may used to produce both one-dimensional and two-dimensional photonic crystals, among other applications.

## 2. Representative Drawing

Figure 5